

Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen – dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik

Thomas Wilhelm, Dieter Heuer

1. Vorteile dynamisch ikonischer Repräsentationen

Für Schüler ist es nicht leicht, aus Versuchen neue Sachverhalte zu erschließen und Zusammenhänge zu erkennen, insbesondere wenn in quantitativen Versuchen Messdaten mit zu interpretieren sind. So kommt es manchmal sogar vor, dass die Schüler entgegen den tatsächlichen Gegebenheiten das sehen bzw. annehmen, was sie aufgrund ihrer Alltagsvorstellungen erwarten [1]. Daher ist es wichtig, die Versuchsdaten bereits so aufzubereiten, dass im Kurzzeitgedächtnis genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, Versuchsaussagen im Zusammenhang mit anderen Sachverhalten zu analysieren und sie dann zueinander in Beziehung zu setzen.

Häufig wird man daran denken, funktionale Abhängigkeiten physikalischer Größen durch Graphen wiederzugeben. Dies ist aber nur ein effizientes Vorgehen für diejenigen, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und außerdem Erfahrungen haben, mit Graphen umzugehen, Graphen also sicher lesen können. Denn hier kommen auf Schüler zwei Schwierigkeiten gleichzeitig zu: Die Aussagen des oder sogar der Graphen müssen erfasst, zueinander in Beziehung gesetzt, interpretiert und dann mit den vorhandenen Vorstellungen in Beziehung gebracht werden [2]. Es ist daher wichtig, den Lernenden eine leichter zu erfassende Darstellung der relevanten Größen anbieten zu können. In dieser Darstellung sollten:

- wichtige Größen und Aussagen durch die gewählte Kodierung möglichst ohne lange logische Implikationen direkt erfassbar sein, wozu sich ikonische Bildelemente anbieten (siehe unten),
- der Ablauf auch in Echtzeit dargestellt werden, also nicht erst etliche Zeit später, sondern gleichzeitig mit dem Versuch,
- eine auf das Wesentliche reduzierte Animation des Versuchsablaufs auf dem Bildschirm gleichzeitig mit dargestellt wird, die das episodische Gedächtnis unterstützt und damit das Erinnern erleichtert und eine spätere Interpretation eines Versuchsablaufs und eine erfolgreiche Diskussion darüber erst ermöglicht.
- die relevanten physikalischen Größen in ikonischen Bildelementen dargestellt werden, die dynamisch mit der Animation mitlaufen.

Piktogrammartige Darstellungen einer Versuchssituation, z.B. mit Vektoren, Pfeilen, Verbindungslinien etc., finden sich in vielen Schulbüchern. Ihr häufiges Vorkommen zeigt offensichtlich, dass sich Aussagen mit ihnen prägnant verdeutlichen lassen. Sie haben aber ein

prinzipielles Handicap: Es handelt sich jedoch stets um ein statisches Einzelbild, das nur eine Momentansituation aufarbeitet und nicht einen Versuchsablauf. Mit einem Rechner und geeigneter Software, z.B. PAKMA für Windows, ist es jedoch möglich, solche physikalische Repräsentationen eines realen wie auch simulierten Versuchsablaufs dynamisch mit den zugehörigen zeitlichen Veränderungen am Bildschirm aufzuzeigen. Damit sind physikalische Strukturzusammenhänge unmittelbarer und damit leichter erschließbar [3].

In einer erweiterten Darstellung sollten dann zusätzlich zu diesen ikonischen Bildelementen Graphen mit angezeigt werden. Denn ihnen sind wichtige Aussagen über das gesamte Verhalten des Ablaufs zusammengefasst zu entnehmen. Außerdem ist die Fähigkeit, Graphen zu interpretieren, ein eigenes Lernziel des Physikunterrichts. Während mit ikonischen Bildelementen ein momentaner Querschnitt über alle relevanten physikalischen Größen gegeben wird, stellt ein Graph einen Längsschnitt einer Größe über den ganzen Versuchsablauf dar [4]. Der synchrone Einsatz mehrerer verschiedener Kodierungssysteme, wie z.B. Pfeile und Graphen, bietet nun dem Lernenden die Möglichkeit, kurzzeitig von einer noch ungewohnten, logisch abstrakten Kodierung auf eine gewohntere bildlichere zu wechseln, um so mit den gewonnenen zusätzlichen Informationen Verständnisschwierigkeiten abzubauen [5].

Hat man die Möglichkeit, physikalische Aussagen dynamisch ikonisch darzustellen, ergeben sich damit neue Methodenkonzepte für den Unterricht, die zur Überwindung von Fehlvorstellungen in der Dynamik beitragen können.

2. Betonung des vektoriellen Charakters von Beschleunigung und Kräften

2.1 Beschleunigung als Grundlage

Um das Grundgesetz der Mechanik $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ verstehen zu können, ist eine Grundvoraussetzung, dass der physikalische Begriff der Beschleunigung verstanden und so gefestigt ist, dass Beschleunigungsvektoren schrittweise aus den grafisch vorgegebenen Zeit-Orts-Daten eines Bewegungsablaufes konstruiert werden können, was erfahrungsgemäß nicht bei allen Schülern zu Beginn des Dynamikunterrichts gegeben ist. Wie in [6] aufgezeigt wird, bieten ikonische Bildelemente, hier insbesondere Pfeile, eine hervorragende Möglichkeit, wichtige Schritte der gedanklichen Konstruktion zur Ermittlung des Beschleunigungsvektors am Bildschirm zu visualisieren. Damit kann der Beschleunigungsbegriff angemessen erklärt werden und dadurch Fehlvorstellungen bei der Erarbeitung des Beschleunigungsbegriffes vermieden bzw. abgebaut werden. Auf diese Weise wird, was für das Verständnis der Dynamik wichtig ist, die Beschleunigung für Schüler als vektorielle Größe und nicht nur als eine skalare Größe konzeptualisiert. Zusätzlich können die Schüler dadurch, dass sie auf dem Bildschirm zu den verschiedenen Bewegungen die eingezeichneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren sehen, eine qualitative Vorstellung davon gewinnen, welche Richtung und Größe diese Vektoren etwa haben. Dies gilt um so mehr, wenn die Schüler solche Darstellungen nicht nur als Demonstrationen im Rahmen eines Klassengesprächs verfolgen können, sondern sie selbst

im Rechnerraum – in Zukunft hoffentlich bald am eigenen Notebook im Physikraum - mit der Maus als x-y-Ortssensor eigene Bewegungen vorgeben. Denn diese können dann am Bildschirm dargestellt und vom Rechner bezüglich der Konstruktion der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren direkt aufbereitet werden, so dass eigene Vorstellungen/Vorhersagen durch unmittelbare Erfahrungen rückgekoppelt werden.

2.2 Kräfte als gerichtete Größen

Bei der Behandlung der Kraft ist es ebenso wichtig, dass die Schüler Kraft als einen Vektor auffassen und insbesondere ihnen deutlich wird, dass Kräfte vektoriell addiert werden. Dies kann auch dadurch unterstützt werden, dass wie in der Mittelstufe Kräfte nicht nur als Pfeile ikonisch dargestellt werden, sondern auch damit gearbeitet wird. Wie wichtig dies im Zusammenhang mit der Dynamik ist, wird im Abschnitt 5 ausgeführt.

3. Lernschwierigkeiten im Dynamik-Unterricht

3.1 Was heißt Lernen?

Schüler bringen vielseitige Vorstellungen in den Unterricht mit und sind keine "tabula rasa", die einfach physikalisches Wissen übernehmen kann. Es besteht heute eine gewisse Übereinstimmung darin, dass Lernen und menschliche Erkenntnis allgemein nur auf der Basis des vorhandenen Vorwissens, also der bereits gebildeten Vorstellungen und Konzepte, möglich ist, da neue Sachverhalte an vorhandenem Vorwissen angehängt werden [7, S. 592]. Lernen ist dabei ein aktiver Prozess des Schülers, der seine Vorstellungen und damit auch sein Wissen selbst konstruieren muss. Die Vorstellung, im Physikunterricht müsse nur alles ganz exakt definiert und richtig experimentell demonstriert werden, dann verschwinden die Fehlvorstellungen von selbst, ist demnach falsch. *"Verstehen heißt, Einsicht in größere Zusammenhänge gewinnen, z.B. durch die Aktivierung von Umfeldwissen, durch Analogien, Metaphern, Modelle, durch Verknüpfen bisher getrennter Erfahrungen ein Phänomen nicht nur einlinig zu erklären, sondern es von verschiedenen Standorten, damit unter verschiedenem Blickwinkel wahrzunehmen und es in einem umfassenderen Kontext einzubetten."* [8] Dieses Verstehen ist ein individueller Denkprozess, der oft sprunghaft geschieht. Zu einer Veränderung der Schülervorstellungen ist nun ein solches Verstehen nötig. Man lernt etwas nicht dadurch, dass man es sich merkt, aufschreibt, auswendiglernt oder wiederholt, sondern dadurch, dass man sich damit auseinandersetzt, darüber nachdenkt, es verarbeitet, überprüft, kritisiert und schaut, wieweit es zu dem passt bzw. nicht passt, was man bisher weiß.

3.2 Strategien zum Umgang mit Fehlvorstellungen

In der didaktischen Literatur der letzten 15 Jahre gibt es recht unterschiedliche Vorschläge, wie im Unterricht mit Schülervorstellungen umgegangen werden kann. (Einen kommentierten Überblick gibt z.B. [9, S. 23 ff]). Diese Vorschläge lassen sich im Wesentlichen zwei Richtungen zuordnen:

1. Konfliktstrategien, die einen kognitiven Konflikt zwischen Schülervorstellungen und physikalischer Sichtweise erzeugen und dann versuchen, diesen aufzulösen.

2. „Aufbau“-strategien, die an bestehende Vorstellungen anknüpfen, sie z.T. aufnehmen und neu abgrenzen, um dann zusammen mit den zu gewinnenden Erfahrungen und Erkenntnissen angemessene physikalische Konzepte aufzubauen.

Welche Wege für einen Unterrichtsgang dann zu beschreiten sind, hängt u.a. von den Zielsetzungen ab: Sollen z.B. wissenschaftstheoretische Aspekte mit angesprochen werden, exemplarisch bewusst werden oder gar im Vordergrund stehen? Ebenso sind bei diesen Entscheidungen die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden mit einzubeziehen: Wie komplex dürfen die zu erarbeitenden Inhalte sein? Aber auch: Inwieweit können Schüler für metakognitive Betrachtungen interessiert werden?

Für die Erarbeitung der Inhalte zur Grundgleichung der Mechanik, für die im Abschnitt 5 wichtige Experimente und ihre Aufbereitung mit dynamisch ikonischen Repräsentationen (DIR) dargestellt werden, wurde für den Umgang mit Schülervorstellungen von einer Basisstrategie ausgegangen, die durch folgendes Vorgehen charakterisiert ist:

- Eingangs werden relevante Alltagserfahrungen ins Gedächtnis gerufen. Wo Alltagsphänomene nicht so leicht zu erfassen sind, weil sie z.B. zu schnell ablaufen oder Vorgänge im allgemeinen von einem zu einseitigen Standpunkt gesehen werden, kommt es darauf an, die eigenen Erfahrungen zu erweitern, z.B. mit einem Video, das zeigt, wie ein im Kreis geschleudertes Gummistopfen nach dem Loslassen (Abschneiden) weiter fliegt.
- Alle Versuchsaussagen aus quantitativen Experimenten werden mit Hilfe von DIR anschaulich dargestellt und dabei auch strukturelle Aussagen über Größen mit angezeigt, um die Aussagen im Kontext der Versuchssituation möglichst direkt erschließbar zu machen und die Möglichkeiten für Fehlinterpretationen zu reduzieren (s. Abschnitt 5 und den Beitrag [6] in diesem Heft).
- Komplexere Phänomene wie beschleunigte Bewegungen werden nicht nur an einem Einzelfall aufgezeigt, sondern an prototypischen Situationen, um zu vermeiden, dass durch die Beschränkung auf einengende Spezialfälle unangemessene Vorstellungen und Bedeutungen von Begriffen aufgebaut werden (s. Abschnitt 5).
- Bei der Einführung wichtiger Grunderfahrungen wird, so weit es kognitiv vertretbar ist, vom allgemeinen Fall und nicht vom Spezialfall ausgegangen.

Diese Schritte beim Erkennen und Erarbeiten neuer qualitativer und quantitativer Aussagen aus Phänomenen und Experimenten sind zwanglos der obigen „Aufbau“-Strategie zuzuordnen. Fehlvorstellungen werden dabei bei der Auswahl der Experimente und Beispiele berücksichtigt, ohne sie vorher explizit zu formulieren. Erst nachdem das physikalische Konzept vorgestellt ist, wird es an geeigneten Stellen den Alltagssichtweisen gegenübergestellt. Da die Schüler aber vor dem Ablauf einer Messung oder einer Simulation häufig vorhersagen sollen, was sie erwarten (s. Abschnitt 4.2), können sich auch Elemente einer Konfliktstrategie ergeben.

3.3 Einige typische Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen

Im weiteren werden typische Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen, die bei der Erarbeitung des 2. Newtonschen Gesetzes auftreten, anhand von Vorschlägen für Experimente angesprochen, in denen die Aussagen durch DIR aufbereitet werden. Im Einzelnen sind dies:

- Die Proportionalität $a \sim F$ gilt nur im Mittel eines Zeitintervalls, s. Abschnitt 5.2.
- Die Grundgleichung der Mechanik $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ wird auf das Wirken nur einer Kraft reduziert, s. Abschnitt 5.3 und 7.4.
- Die Summe der Kräfte wird als Summe der Beträge gesehen, s. Abschnitt 5.3.
- Reibung ist nur ein Widerstand gegen die Bewegung, aber keine gerichtete Kraft, s. Abschnitt 5.4 und 7.4.
- Die Geschwindigkeit ist zur Antriebskraft proportional: v bzw. $v_{end} \sim F$, s. Abschnitt 5.4.

4. Verändertes Lernen

4.1 Aktive Auseinandersetzung

Wie im Abschnitt 3.1 bereits dargelegt wurde, ist zur Veränderung von Schülervorstellungen ein Verstehen der physikalischen Sichtweise notwendig. Dazu muss der Dynamikunterricht erreichen, dass die Schüler sich aktiv mit den behandelten Themen, Sachverhalten und Aussagen auseinandersetzen. Moderne Unterrichtsformen wie Freiarbeit und Projektarbeit, die sich für andere Zielsetzungen bewährt haben, sind allerdings nur wenig geeignet, stabile Fehlvorstellungen zur Dynamik zu überwinden und einen Konzeptwechsel herbeizuführen. Auch wenn im lehrergeleiteten Unterricht alle Experimente als Demonstrationsversuche vorgeführt werden, ist mit Hilfe der dynamisch ikonischen Darstellungen trotzdem ein schülerzentrierter Unterricht möglich: Aufgabe der Schüler ist es insbesondere, Vorhersagen zu machen, die Ergebnisse von Versuchen zu formulieren, zu beschreiben, zu diskutieren und sie zu den Vorhersagen in Beziehung zu setzen.

4.2 Vorhersagen als erster wichtiger Schritt zur Klärung

Ein sehr wichtiger Punkt für die Eigenaktivität ist, dass vor der Durchführung der Versuche und später dann vor dem Ablauf eines selbst erstellten Modells von den Schülern genaue Vorhersagen gefordert werden, insbesondere über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen und ihren Änderungen. Anschließend können die Schüler ihre Vorhersagen mit den Abläufen vergleichen.

Entscheidend ist dabei, dass der Lehrer nicht sagt, ob die Vorhersage richtig oder falsch ist, auch nicht indirekt durch Bemerkungen wie "Bist du dir da sicher?" oder "Denk' doch noch 'mal genau darüber nach!" Die Vorhersagen sollen weder bewertet noch hinterfragt werden, sondern vom Lehrer sollen nur verschiedene Vorhersagen gesammelt und vergleichend nebeneinander gestellt werden. Besonders die Unterschiede zwischen verschiedenen Vorhersagen sollen vom Lehrer aufgezeigt werden.

Durch die Vorhersagen können sich die Schüler ihrer eigenen Ideen und Vorstellungen bewußt werden. Bei der anschließenden Ablauf werden die Schüler ihre Aufmerksamkeit besonders auf die Dinge richten, die unterschiedlich vorhergesagt wurden, und auch leichter erkennen, welche

Vorhersage richtig war. Hätten die Schüler keine Vorhersagen gemacht, würden sie sich kaum über den Versuchsablauf wundern. So aber werden bei den Schülern kognitive Konflikte erzeugt und damit der Wunsch geweckt, den Vorgang zu verstehen, also nach einem korrekten Konzept. Dieses Infragestellen der eigenen Vorstellung passiert evtl. auch erst nach mehreren solchen Erfahrungen, so dass öfters so vorgegangen werden muss. Außerdem besteht hierdurch die Möglichkeit, während der Lehrstoff behandelt wird, die dazugehörigen Schülervorstellungen zu thematisieren. Wichtig ist dabei, dass die Schülervorstellungen nicht als falsch kritisiert werden, sondern als verständlich und für die Deutung von Alltagsphänomenen als hilfreich betrachtet werden. Dann aber ist zu analysieren, wie die Schülervorstellungen die experimentellen Befunde erklären und wie mit alternativen Vorstellungen umfassendere Erklärungen möglich sind, die dann im Vergleich zu bewerten sind.

4.3 Prototypische Schritte zur Erarbeitung und Deutung physikalischer Aussagen

Im Detail kann die Behandlung eines Experiments mit Vorhersagen wie folgt ablaufen:

1. Der Lehrer zeigt den Versuch als qualitativen Versuch, d.h. ohne Messwerterfassung mit dem Computer.
2. Die Schüler machen schriftlich auf einem vorbereiteten Antwortbogen Vorhersagen zu typischen Situationen.
3. Der Lehrer sammelt Vorhersagen der Schüler und stellt sie vergleichend nebeneinander.
4. Der Lehrer führt das Experiment mit dem Computer durch.
5. Die Schüler vergleichen dabei das Ergebnis mit ihren Vorhersagen.
6. Einzelne Schüler beschreiben den Versuchsablauf und den Unterschied zu ihrer Vorhersage.
7. Im Klassengespräch wird eine Erklärung für den Versuchsablauf und die unzutreffenden Vorhersagen gesucht (Falsch wären sie im engeren Sinne nur, wenn sie sich durch falsche logische Schlüsse aus den Schülervorstellungen ergeben hätten).
8. Danach können analoge Situationen diskutiert oder Versuchsvarianten behandelt werden.

Ein ähnliches Vorgehen beschreiben für die Schule *Blaschke* und *Heuer* [10, S. 88] und für Vorlesungen *Sokoloff* und *Thornton* [11, S. 340], wobei sie jeweils zusätzlich an unterschiedlichen Stellen Kleingruppenarbeit einsetzen.

Die Behandlung eines Simulationsablaufes kann auf ähnliche Weise mit Vorhersagen ablaufen. Sinnvoll ist jedoch, wenn dieser Ablauf nach einem Modell abläuft, das erst gemeinsam mit Hilfe eines Modellbildungssystems (s. Abschnitt 7) erarbeitet wird:

- Der Lehrer zeigt auch hier einen qualitativen Versuch als Phänomen, den die Schüler beschreiben.
- Nach den Vorschlägen der Schüler wird gemeinsam ein Modell erstellt. Der Lehrer moderiert nur die Diskussion der Klasse über die Modellstruktur bzw. regt sie an. Er selbst oder ein Schüler gibt die Vorschläge in den Computer ein. Auch konkrete falsche Vorschläge werden umgesetzt.
- Man lässt das Modell als eine Animation mit dynamische ikonischen Repräsentationen ablaufen. Dazu werden Animationen eingesetzt, die bereits vorgefertigt zur Verfügung stehen.

- Die Schüler erkennen vor allem an der Animation, dass ihr Modell das Phänomen nicht korrekt beschreibt. Häufig sind die Gründe anscheinend formale Fehler, wie z.B. dass falsche Vorzeichen bei einzelnen Kräften. Dahinter steht aber, dass den Schülern die Richtungscharakter der Kräfte, wie z.B. bei Reibungskräften oder bei der Hookeschen Feder nicht bewußt ist und sie nur Gleichungen für die Beträge der Kräfte angeben.
- Die Schüler erkennen hier die Fehler an dem Modell, das entsprechend ausgebessert wird, bis es mit dem realen Versuchsablauf übereinstimmt.

Nun kann mit dem selbst erstellten Modell gearbeitet werden, wobei genauso wie bei den Experimenten Vorhersagen eine wichtige Rolle spielen:

- Die Schüler machen Vorhersagen zu typischen Situationen des Modellablaufs oder zeichnen schriftlich auf einem vorbereiteten Arbeitsblatt die erwarteten Graphen.
- Der Lehrer sammelt die Vorhersagen der Schüler und stellt sie vergleichend nebeneinander.
- Man lässt das Modell wieder mit dynamische ikonischen Repräsentationen und mit Graphen ablaufen.
- Die Schüler vergleichen dabei das Ergebnis mit ihren Vorhersagen.
- Einzelne Schüler beschreiben den Unterschied zu ihrer Vorhersage.
- Im Klassengespräch wird unter Zuhilfenahme des Wirkungsgefüges des Modells eine Erklärung für den Modellablauf und die unzutreffenden Vorhersagen gesucht.

4.4 Alternative Vorstellungen als konkurrierende Beschreibungen von Realität

Wo im Unterricht eine Konfliktstrategie eingesetzt wird, um den Lernenden Unzulänglichkeiten ihrer Vorstellungen deutlich zu machen, ist es aus mehreren Gründen wichtig, wie diese Vorstellungen im Unterricht bewertet werden. Es wäre sachlich unangemessen und psychologisch ungeschickt, würden „Fehlvorstellungen“, wie z.B. die, Reibung nur als Hemmnis zu sehen, als unsinnig klassifiziert. Denn viele solcher vergleichbaren Vorstellungen sind für uns alle im Alltag hilfreich und nützlich und daher unter Alltagsaspekten sinnvoll. Es hieße Schüler verunsichern und ihnen evtl. auch ihre Offenheit nehmen, wenn diese Aspekte nicht thematisiert und statt dessen nur negativ belegt werden. Viel mehr ist es unbedingt notwendig, dass die Schüler sehen, die physikalische Sichtweise ist auch nur eine Beschreibung der Realität, der generell nicht die Attribute wahr oder falsch zu kommen können. Vielmehr kann der Bereich, in dem konkrete Aussagen gemacht werden können, nur mehr oder weniger umfassend sein. Wie genau Phänomene durch Vorstellungen beschrieben und vorhergesagt werden können, hängt entscheidend davon ab, wie weit quantitative Beschreibungen möglich sind. Denn damit lassen sich dezidiertere Aussagen machen, die dann auf ihre Angemessenheit zu prüfen sind. Für die Naturwissenschaften ist es eine wichtige Einsicht, dass es unterschiedliche Beschreibungen der uns umgebenden Welt gibt, die aber unterschiedlich aussagekräftig sind. Denn im Anfangsunterricht kann häufig die Vorstellung gewonnen werden, physikalische Gesetze und Begriffe sind absolute Wahrheiten. Um so wichtiger ist es, hier exemplarisch aufzuzeigen, dass es keine zwingende Herleitung von Vorstellungen und Theorien aus Phänomenen gibt. Ein Unterrichtsziel ist, dass die Schüler die physikalische Sichtweise ver-

stehen und lernen, physikalisch zu argumentieren. Der Schüler muss aber nicht davon überzeugt werden, dass seine Sichtweise die einzig mögliche ist; er darf seine Sichtweise in einem bewußten und reflektierten Nebeneinander neben der physikalischen Sichtweise durchaus behalten, sollten aber ihre Unterschiede klar herausstellen können.

5. Erschließende Versuche zur Grundgleichung der Mechanik

5.1 Der Sinn, viele Experimente durchzuführen

Experimente spielen im Physikunterricht seit langem eine bedeutende Rolle. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass Schüler viele konkrete Situationen kennenlernen sollen, in denen wichtige physikalische Konzepte verdeutlicht, wiedererkannt, zur Erklärung angewandt oder sogar erschlossen werden können. Dazu ist es nötig, eine größere Anzahl von Experimenten zu unterschiedlichen Situationen durchzuführen. Dabei sehen Schüler außerdem die Tragfähigkeit und die Reichweite von Konzepten und Gesetzmäßigkeiten, was eine Basis schafft, evtl. auch Vorstellungen zu ändern. Die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in immer wieder neuen Situationen hilft dem Schüler, selbst ein angemessenes mentales Modell zu entwickeln und nicht beim Lernen einzelner Wissens Elemente oder sogar nur bei Formeln stehen zu bleiben. Natürlich kostet es Zeit, viele Experimente durchzuführen. Deshalb ist es sinnvoll, nachdem Schüler die Bedeutung des Messens, Auswertens und Zeichnens durch eigenes Tun erfahren haben, diese Arbeiten durch den Einsatz des Rechners zu automatisieren. Dann ist es möglich, die aufbereiteten Messergebnisse von Versuchsvarianten sofort zur Verfügung zu haben, um ihre Aufbereitung unmittelbar zu diskutieren und zu interpretieren sowie auch spontan auf Schülervorschläge für Versuchsänderungen eingehen zu können.

5.2 Eindimensionaler Schlüsselversuch zum 2. Newtonschen Gesetz: $\vec{a} \sim \vec{F}$

Zur experimentellen Bestätigung der Aussage, dass die äußere Kraft \vec{F} , die an einem Körper angreift, eine zu \vec{F} proportionale Beschleunigung \vec{a} bewirkt, werden herkömmlicherweise eindimensionale Beschleunigungsversuche mit konstanten äußeren Kräften durchgeführt, in denen aus Weg-Zeit- oder Geschwindigkeits-Zeit-Messung \vec{a} berechnet wird. Mit dem Rechner kann man statt vieler Einzelmessungen mit einem Versuchsablauf viele Messdaten erheben und auswerten und dadurch die Arbeit erleichtern. Die Proportionalität von \vec{F} und \vec{a} kann man für den eindimensionalen Fall direkt aufzuzeigen, wenn man die Größe der Kraft \vec{F} während eines Versuchsablaufs beliebig ändern kann und dabei \vec{a} und \vec{F} quasi kontinuierlich misst. Die Hangabtriebskraft eines Gleiters auf einer Luftkissenbahn bietet sich für solche Versuche an, da sie über die Fahrbahn-Neigung leicht variiert und ihre Größe auch gemessen werden kann [12; 13]. Dazu wird in jedem Moment des Versuchs die Strecke be-

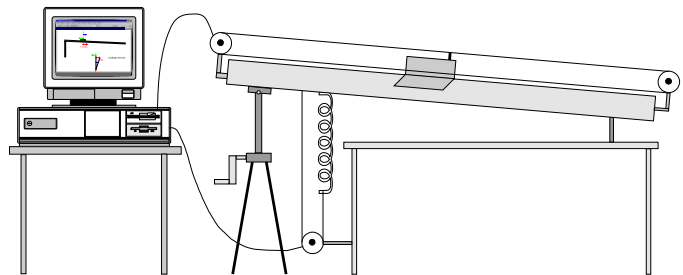


Abb. 1: Versuchsaufbau für den Schlüsselversuch zu $\vec{a} \sim \vec{F}$

stimmt, die ein Fahrbahnde über die Horizontale angehoben bzw. gesenkt wird, woraus man dann sofort \vec{F} erhält. Die Bewegung wird wieder über ein Präzisionslaufrad gemessen, das über einen umlaufenden Faden über zwei Umlenkrollen mit dem Gleiter verbunden ist, s. Abb. 1, und daraus die Beschleunigung \vec{a} ermittelt. Die Hubhöhe wird über ein entsprechendes zweites Laufrad erfasst.

Mit dynamisch ikonischen Darstellungen kann nun die Proportionalität von a und \vec{F} anschaulich deutlich werden: Während eines Versuchsdurchgangs sieht man nun in Echtzeit in einer Animation, wie die Luftkissenbahn gekippt wird und sich der Gleiter bewegt (s. Abb. 2). Gemessene Geschwindigkeit, die aus den Messdaten ermittelte Beschleunigung sowie die wirkende Hangabtriebskraft können dann als Pfeile an den Gleiter angezeichnet werden und auch ortsfest gezeigt werden

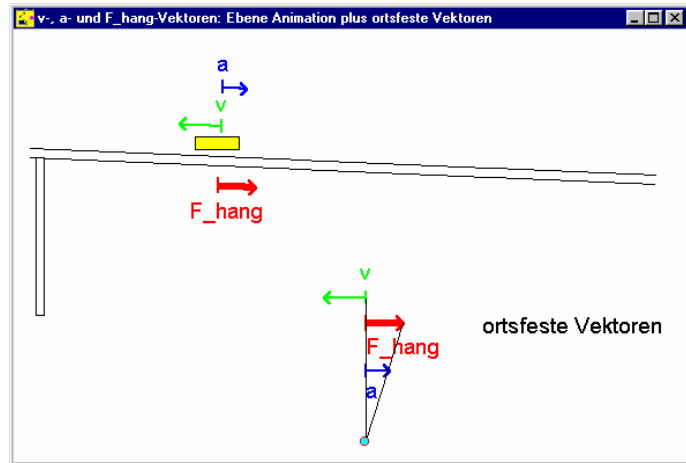


Abb. 2: Ein Momentbild der dynamisch ikonischen Darstellung des Versuchsaufbaus

(s. Abb. 2). Die Bewegung der Endpunkte der parallelen Pfeile \vec{F} und \vec{a} , lässt sich so charakterisieren: Ihre Endpunkte liegen stets auf einem Strahl, der sich um seinen Ursprung dreht. \vec{F} und \vec{a} gehen also durch zentrische Streckung auseinander hervor, daher ist $\vec{a} \sim \vec{F}$ und zwar völlig unabhängig von der momentanen Geschwindigkeit \vec{v} . Beim Versuch muss nur darauf geachtet werden, dass der Gleiter nicht am Fahrbahnde anstößt, da sonst zusätzliche Kräfte wirken, die nicht erfasst werden. Mit dieser Darstellung vermeidet man, dass der Eindruck erweckt wird, die Proportionalität von \vec{a} und \vec{F} gelte nur im Durchschnitt eines Zeitintervalls, da deutlich wird, dass sie in jedem Zeitpunkt gilt. Dieser Versuch kann also ein Schlüsselversuch sein, um das grundlegende 2. Newtonsche Gesetz zu erschließen und zu verdeutlichen.

5.3 Erweiterung auf mehrere wirkende Kräfte

In der Vorstellung der Schüler reduziert sich die Aussage des Grundgesetzes der Mechanik in der Regel auf das Wirken *einer* Kraft. Das ist nicht ganz überraschend, werden die typischen Beschleunigungsversuche doch nur mit einer Zugkraft durchgeführt. Eine weitere Schwierigkeit für die Anwendung des Kraftwirkungsgesetzes liegt für die Schüler darin, dass es vielfach nicht offensichtlich ist, welche Kräfte zur Beschleunigung eines Körpers beitragen. Der oben aufgeführten Versuch mit der Hangabtriebskraft lässt sich so erweitern, dass man in einem weiteren Versuchsdurchlauf, die Wirkung mehrerer äußerer Kräfte auf den Luftkissengleiter zeigen kann. Als zusätzliche Kraft zur variablen Hangabtriebskraft bietet sich sowohl die Kraft eines kleinen Zuggewichts an, das über Faden und Rolle auf den Gleiter wirkt als auch die Schubkraft, die ein Propeller ausübt, der auf dem Gleiter befestigt ist.

Typisch ist, dass bei einer Vorhersage des Versuchsausgangs zwar einige Schüler die zusätzliche Kraft berücksichtigen. Sie können aber bei der Versuchsdurchführung die jetzt auftretenden Beschleunigungen, die nun nicht mehr zur Hangabtriebskraft \vec{F}_H proportional sind, sondern entsprechend Abb. 3 mal größer mal kleiner sind, nicht aus der Summe von \vec{F}_H und \vec{F}_{Zusatz} erklären. Offensichtlich denken die Schüler bei der Summe der Kräfte zuerst nur an die der Beträge. Dass hier die Vektorsumme zu bilden ist, kommt vielen

Schülern erst in den Blick, wenn sie an der dynamisch ikonischen Darstellung sehen, dass ihre Erklärung der Versuchsergebnisse nicht stimmig ist.

Um während eines neuen Versuchs oder bei der Reproduktion eines bereits durchgeführten die Idee der Vektorsumme der Kräfte auch grafisch sichtbar zu machen, wird die fehlende Kraft \vec{F}_{Zusatz} als Pfeil dynamisch mit in das Vektordiagramm wie in Abb. 3 eingezeichnet, um dann die Proportionalität $\vec{a} \sim (\vec{F}_H + \vec{F}_{Zusatz})$ als wichtige neue Aussage zu visualisieren. Dazu könnte man die Kraft vorher messen und entsprechend im Programm berücksichtigen. Eine andere Möglichkeit ist, während des Programmlaufs auf Tastendruck eine momentane Anpassung vorzunehmen - aus dem gemessenen \vec{a} wird \vec{F}_{Zusatz} berechnet -, um dann zu sehen, ob diese Anpassung für den Rest des Versuchs gültig bleibt.

Begriffe wie resultierende Kraft, Ersatzkraft oder beschleunigende Kraft (Alle Kräfte sind doch beschleunigend!) verleiten Schüler zu der Fehlvorstellung, dass es sich dabei um eine weitere Kraft, der Hangabtriebskraft gleichberechtigten Kraft handelt. Deshalb empfiehlt es sich, von der Gesamtkraft oder besser Summe der Kräfte zu sprechen und das zweite Newtonsche Gesetz in der Form $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ zu schreiben. Um zu vermeiden, dass die Schüler dies so interpretieren, dass die Masse und die Beschleunigung die Gesamtkraft ergibt, ist es gemäß dem Ursache-Wirkungskonzept, das sich in Gleichungen mit ausdrückt, noch besser $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ zu formulieren (s. Abschnitt 7.3).

5.4 Reibungskräfte als vektorielle Kräfte sehen

Reibungskräfte werden in Schülervorstellungen nur als Widerstände gegen die Bewegung angesehen, aber nicht als wirkliche Kräfte. Deshalb ist es sehr wichtig, auch Bewegungen mit Reibungskräften zu behandeln. Die Grundidee, mit der die Proportionalität von \vec{a} und $\Sigma \vec{F}$ im letzten Abschnitt 5.3 aufgezeigt wurde, beruht darauf, aus der gemessenen Beschleunigung \vec{a} auf

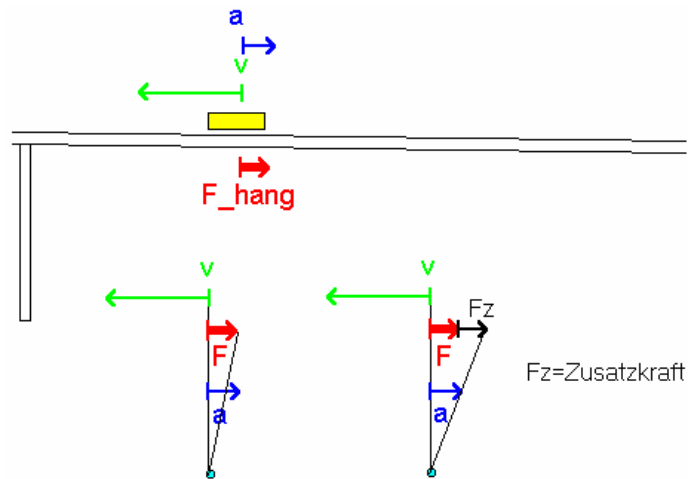


Abb. 3: Ein Momentbild der dynamisch ikonischen Darstellung des Versuchsaufbaus mit einer Zusatzkraft, um $\vec{a} \sim \Sigma \vec{F}$ aufzuzeigen

die Summe aller äußeren Kräfte zu schließen. Falls sich mit den bekannten Kräften keine Proportionalität ergibt, muss die fehlende Kraft bzw. müssen die fehlenden Kräfte gesucht werden. Dieses 'Detektivspiel' besteht aus zwei Teilen: zuerst müssen die Eigenschaften der fehlenden Kräfte aus den Versuchen ermittelt werden. Anschließend sind die Ursachen der anfänglich nicht erkannten Kräfte zu identifizieren.

Bringt man an einem Gleiter auf der den Schülern abgewandten Seite einen weichen, federnden Bügel mit Schaumstoffpolster so an, dass dieser die Gleitschiene leicht berührt, so wirkt auf den sich bewegenden Gleiter eine kleine Gleitreibungskraft \vec{F}_{reib} . Den Schülern teilt man von dieser Veränderung nur mit, dass für die kommenden Versuche mit einem leicht abgeänderten Gleiter gearbeitet wird. So kommt es für sie darauf an, mit Hilfe der Pfeildarstellung herauszufinden, ob die Veränderung am Gleiter entsprechend dem letzten Abschnitt auch hier eine zusätzliche Kraft bewirkt und welche Eigenschaften diese gegebenenfalls hat. Versuche zeigen, dass die unbekannte Kraft während der Bewegung etwa eine konstante Größe hat, sie aber mehrfach ihre Richtung ändert. Auch gute Schüler haben Schwierigkeiten, die beobachtete wiederholte Richtungsumkehr zu erklären, bis es dann fast zu einem Aha-Erlebnis kommt: Mit der Bewegungsrichtung kehrt sich auch die Kraftrichtung um, was ihnen bisher offensichtlich nicht deutlich war. Auch hier helfen die eingezeichneten dynamischen Vektoren mit ihren Richtungen, die Versuchssituation zu klären und strukturell wichtige Aussagen zu visualisieren und dadurch leichter erschließbar zu machen.

Für das Verständnis der newtonschen Dynamik sind Versuchssituationen mit geschwindigkeitsabhängigen Reibungskräften noch viel wichtiger als solche mit konstanten Reibungskräften, da diese für die Fehlvorstellung verantwortlich sind, dass die Geschwindigkeit \vec{v} eines Körpers proportional zur wirkenden äußeren Kraft ist. Wegen der Übertragbarkeit auf Alltagssituationen sind Versuche mit im Verhältnis zur Antriebskraft großen Luftreibungskräften wünschenswert, beispielsweise mit Barthschen Fallkegeln [14].

Auf der Fahrbahn sind die Luftreibungskräfte viel zu klein. Nimmt man als Widerstandsfläche eine Platte in der realistischen Größe eines DIN A3-Blattes, erhält man die kleine Luftreibungskraft $F_{Luft} = 0,083 \frac{Ns^2}{m^2} \cdot v^2$. Hängt man an diesen Gleiter der Masse $m_G = 400$ g ein Zuggewicht von $m_{Zug} = 4,0$ g, erhält man rechnerisch zwar eine Endgeschwindigkeit von $0,69 \frac{m}{s}$; man müsste den Gleiter aber auf der Luftkissenfahrbahn mindestens 12 s bzw. mindestens 5 m (!) fahren lassen, um zu erkennen, dass die Geschwindigkeit konstant wird.¹ Mit einem Fahrrad, das mit etwa konstanter Kraft gezogen wird, ist die Luftreibungskraft auch in einem Alltagskontext überzeugend nachweisbar [16, S. 10].

Will man die Wirkung einer geschwindigkeitsabhängigen Kraft an einem Fahrbahnversuch untersuchen, so ist das sehr viel überzeugender durch einen Wirbelstrombremseffekt als durch Luftreibung zu erreichen. Dazu bringt man Scheibenmagnete auf den Gleiter einer Metall-Luft-

¹ Bader gibt für diesen Versuch Größenwerte an, die einer unrealistischen und sicher instabilen Widerstandsfläche aus Styropor von ca. $3,9 \text{ m}^2$ (!) entsprechen [15, S. 54].

kissenbahn an [12; 13]. Als Scheibenmagnete wurden Magnete (\varnothing ca. 3 cm) für Magnet-Pinwände verwendet, wie sie in Schreibwarenläden angeboten werden. Für eine große Wirkung ist ihre Ausrichtung wichtig (s. Abb. 4). So erhält man eine große Bremskraft

$$F_{\text{Wirbel}} = 0,57 \frac{\text{Ns}}{\text{m}} \cdot v.$$

In dem dann vorgeführten Versuch - der Gleiter wird durch den Propeller oder eine konstante Hangabtriebskraft angetrieben - erkennen die Schüler sofort die ihnen bekannte Alltagssituation wieder: Nach einer Anfahrphase erreicht das Fahrzeug bei gleichbleibender Antriebskraft \vec{F}_{Antrieb} eine Endgeschwindigkeit \vec{v}_{end} .

Vergrößert man \vec{F}_{Antrieb} so wird auch \vec{v}_{end} größer. Lässt man die fehlende Kraft \vec{F}_{Zusatz} , die aus \vec{F}_{Antrieb} und der Beschleunigung \vec{a} berechnet wird, mit in des Vektorenbild einzeichnen, so kann man die Bewegung durch Betrachten der Reproduktion, auch in Einzelschrittschaltung, leicht analysieren (s. Abb. 5). Die zusätzliche Kraft \vec{F}_{Zusatz} und \vec{v} haben entgegengesetzte Richtung,

$|\vec{F}_{\text{Zusatz}}|$ nimmt mit $|\vec{v}|$ zu, wodurch die Gesamtkraft $\Sigma \vec{F} = \vec{F}_{\text{Antrieb}} + \vec{F}_{\text{Zusatz}}$ und ebenso \vec{a} abnimmt, bis \vec{v} praktisch seinen Endwert erreicht. Die Schwierigkeit, ob ein möglicher Einfluss als Kraft anzusehen ist, ist hier einfach dadurch gelöst, dass die Kräfte nur über ihre Wirkung erfasst werden, nämlich durch ihre Beschleunigung.

6. Qualitative Aufgaben

Es wird immer wieder gefordert, nicht nur Rechenaufgaben im Physikunterricht zu stellen, sondern auch Aufgaben, die ein Verständnis für Konzepte und Modelle verlangen sowie Aufgaben, deren Beantwortung eine Überwindung von Fehlvorstellungen voraussetzen. Außerdem sollten Aufgaben nicht nur nach der Phase der Erarbeitung in einer eigenen Übungsphase vorkommen, sondern in allen Unterrichtsphasen eingesetzt werden. Dies ist beides mit Vorhersagen zu dynamisch ikonischen Darstellungen einfach möglich. Sowohl bei Realexperi-

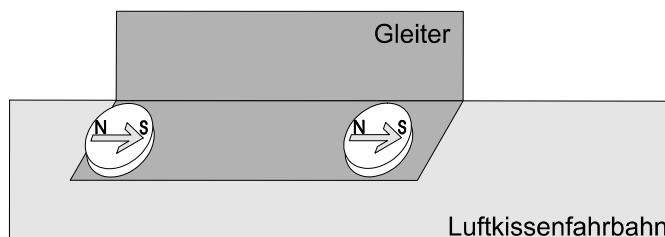


Abb. 4: Optimale Ausrichtung der Magnete auf dem Gleiter, entsprechend auf der Rückseite

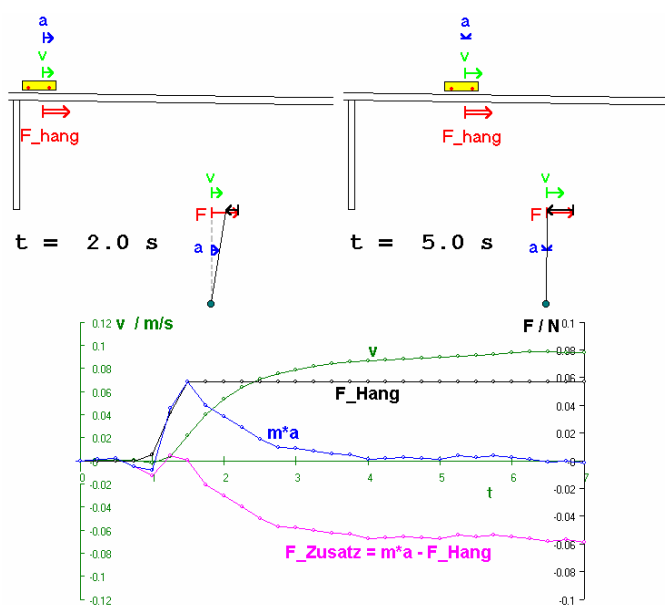


Abb. 5: Gleiter mit Wirbelstrombremse auf leicht geneigter Luftkissenfahrbahn, zwei Momentbilder und Graph; v , a und F_{Hang} wurden gemessen, F_{Zusatz} daraus berechnet

menten als auch bei Simulationen können die Schüler hier in allen Unterrichtsphasen qualitative Vorhersagen machen und begründen.

Wenn die Schüler erst einmal daran gewohnt sind, physikalische Aussagen in ikonischen Darstellungen auszudrücken, dann können ihre Fähigkeiten auch in Testaufgaben geprüft werden (s. Abb. 6). Dadurch sind qualitative, verständnisverlangende Aufgaben zu Vorgängen möglich, die quantitativ nicht bearbeitet werden können.

Die Art der Leistungsbewertung und die Art der Prüfungsaufgaben ist natürlich entscheidend dafür, wie Schüler lernen. Wenn primär fakten- oder algorithmenorientiert geprüft wird, gibt es keine Notwendigkeit, das Thema so zu durchdenken, das ein Verständnis erreicht wird [7, S. 595+598]. Deshalb sind qualitative, verständnisvoraussetzende Aufgaben nötig.

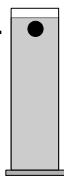
7. Graphisches Modellbildungssystem

7.1 Physikalische Strukturzusammenhänge visualisieren

Wichtige Aussagen über physikalische Abläufe können auf unterschiedliche Weise prägnant dargestellt werden. In den vorangehenden Abschnitten wurden dazu sowohl Liniengraphen (s. z.B. Abb. 3) als auch dynamisch ikonische Repräsentationen (DIR) eingesetzt (s. z.B. Abb. 5 unten). Während Liniengraphen einen Längsschnitt über das Verhalten einzelner Größen wiedergeben (i. Allg. über die Zeit), repräsentieren die DIR einen Momentanzustand (Situation). Sie stellen dazu die momentanen Werte der relevanten physikalischen Größen des Systems – häufig zusammen mit den Veränderungen zum vorausgegangenen Momentbild – bildlich dar im Kontext zu der Animation, die den äußeren Ablauf des Systems am Bildschirm wiedergibt. Auf diese Weise können typische Abhängigkeiten zwischen Größen unmittelbar erkannt werden.

Um die Abläufe von Versuchssituationen zu erklären oder bei Variation von Parametern vorherzusagen, ist aber mehr nötig als die aus den Abläufen aufbereiteten Daten zu kennen, unabhängig davon, in welcher Form diese repräsentiert werden. Hierfür muss der Lernende Vorstellungen einbringen, wie eine Größe eine andere beeinflusst, wobei auch die Abhängigkeiten von anderen Bedingungen und Größen zu berücksichtigen sind. Dies ist aber i. Allg. nur ein Glied in einer Kette von Abhängigkeiten, die zu bedenken sind, um den gesamten Ablauf zu verstehen. Um Vorstellungen beim Lernenden zu unterstützen, wie Einzelabhängigkeiten untereinander verknüpft sind, kann man solche Wirkungszu-

Eine Kugel der Masse $m = 5,0 \text{ g}$ wird in einer Flüssigkeit mit hoher geschwindigkeitsabhängiger Reibung $F_{\text{Reib}} = k v$ mit $k = 0,14 \text{ Ns/m}$ fallengelassen. Zeichne neben die Kugel Pfeile für die Gewichtskraft, Reibungskraft, Gesamtkraft, die Beschleunigung und die Geschwindigkeit für folgende Fälle: 1. kurz nachdem die Kugel fallen gelassen wurde, 2. nach längerer Fallzeit, bei der sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Wie groß ist diese Geschwindigkeit?

1. 

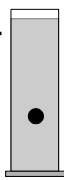
2. 

Abb. 6: Beispiel einer Testaufgabe, bei der ikonische Darstellungen verlangt sind.

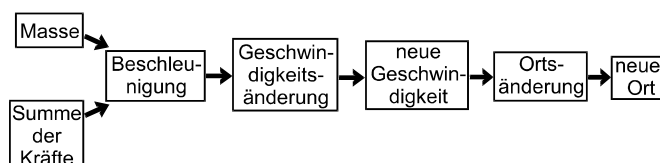


Abb. 7: Skizze, die Wirkungszusammenhänge zwischen Größen visualisiert.

(s. Abschnitt 4.2) wieder eine wichtige Rolle. Dies sind Herausforderungen, denen sich die Lernenden stellen müssen und die die Lernprozesse weiterführen.

Der zweite Aspekt eröffnet die unterrichtliche Erarbeitung authentischer Fragestellungen im Physikunterricht. Häufig glauben Schüler, die physikalischen Erkenntnisse beziehen sich nur auf ideale Gedanken- und Laborwelten, mit denen man im Alltag nichts anfangen kann. Physikalische Aussagen und Gesetze wären demnach nur für Situationen unter Laborbedingungen oder für Gedankenexperimente gültig. Für Normalbedingungen werden andere Gesetze angenommen [17, S. 166]. Deswegen ist es wichtig, dass im Physikunterricht authentische Probleme behandelt und diskutiert werden [18]. Der Schüler soll erfahren, dass das physikalische Wissen für die reale Welt relevant und in ihr anwendbar ist. Authentische Aufgaben sind in der Dynamik meistens auch komplexe Aufgaben. Für die Dynamik bedeutet dies Aufgaben, in denen mehrere Kräfte gleichzeitig wirken und Reibung eine Rolle spielt, denn bei fast allen Bewegungen in Natur und Technik spielen Reibungsvorgänge eine entscheidende Rolle.

Die Durchführung komplexerer Experimente und deren Erfassung der Messwerte mit Hilfe von Computern ist eine Möglichkeit. Natürlich möchte man die Abläufe auch im Detail verstehen, d.h. analysieren und dann möglichst auch vorhersagen bzw. berechnen. Doch dies ist in der Schule auf herkömmlichen Wege kaum möglich. Hängt z.B. eine Kraft und damit die Beschleunigung von der Geschwindigkeit oder vom Ort ab, kann dies zu Differentialgleichungen führen, die nur schwer oder überhaupt nicht explizit lösbar sind, sondern lediglich numerisch mit Hilfe eines Computers.

7.3 Mit Modellbildung arbeiten

Eine hervorragende Lösung für dieses Problem sind hier Modellbildungssysteme. Dabei kommt man selbst bei sehr komplexen Phänomenen mit wenigen Grundbegriffen und Grundgesetzen der Mechanik aus. Im gängigen Physikunterricht stehen bisher Gleichungen im Mittelpunkt, die nur für wenige Spezialfälle einsetzbar sind; bei der Behandlung gleichförmig beschleunigter Bewegungen z.B. die Bewegungsgleichungen $x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v \cdot t + x_0$ und $v = a \cdot t + v_0$. Bei Modellbildungssystemen bilden die grundlegenden Definitionen wie $v = \frac{dx}{dt}$ und $a = \frac{dv}{dt}$ und fundamentalen Gesetze wie $a = \Sigma F / m$ die Grundlage. Eine solche Gewichtsverschiebung von einer Anzahl spezieller Gleichungen für Einzelfälle zu den wichtigen Zusammenhängen ist sicher wichtig für die Förderung des Verständnisses [19, S. 153]. Das ist sicher auch ein Grund dafür, dass die Modellbildung in den Lehrplänen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Bei der Modellbildung sehen die Schüler, dass wenige Grundbegriffe und Gesetzmäßigkeiten ausreichen, um eine Vielzahl von Phänomenen zu berechnen. Häufig werden diese Erkenntnisse im Unterricht durch eine Vielzahl spezieller Lösungen überdeckt.

7.4 Unterrichtserfahrung beim Arbeiten mit Modellbildung

Im Schuljahr 2000/2001 wurde in drei unterschiedlichen Klassen aus zwei Bundesländern nach dem Abschluss des Themengebietes „Dynamik“ noch eine Unterrichtssequenz von jeweils sechs Stunden zur Kinematik und Dynamik mit dem Modellbildungssystem VisEdit [20] gehalten [Lehrer: T. Wilhelm], wobei einige sehr unterschiedliche, komplexere Vorgänge modelliert wur-

den. Die Ergebnisse sind jeweils sehr ermutigend. Die Schüler selbst fanden den Unterricht gut und sagten, dass er ihnen geholfen habe, Zusammenhänge zu verstehen. Am Ende sollten sie bewerten, inwieweit verschiedene Aussagen zum Arbeiten mit dem Modellbildungssystem zutreffen. Dabei gaben die Schüler als besonders positiv an, dass man viele verschiedene Situationen in kurzer Zeit analysieren könne, das Arbeiten mit Rechenmodellen hilfreich für ihr Verständnis sei und realistische Situationen behandelt wurden und nicht wie sonst nur Idealfälle ohne Reibung.

Außerdem sollten die Schüler vor und nach der Unterrichtseinheit in der Form eines Concept maps (d.h. einer Begriffslandkarte) ihre Vorstellungen darlegen, wie verschiedene Größen qualitativ zusammenhängen und welche Größe auf welche wirkt. Dazu wurden den Schülern zwölf Begriffe vorgegeben, die sie ordnen und verbinden sollten. An die Verbindungspfeile sollten Aussagen wie „ist“, „ist Beispiel für“, „bestimmt“, „wirkt auf“, „ändert“ oder „verursacht“ geschrieben werden, so dass die Pfeile meist auch eine Wirkungsrichtung angeben. Dann wurde ermittelt, wie oft die Schüler welche Verbindung angaben und aus den häufigsten Verbindungen (für jede einzelne Klasse und für die Gesamtgruppe) ein typisches Modalmap erstellt [21]. Beim Vortest wurden auch Fehlvorstellungen aufgedeckt, die nur in einer Klasse vorkamen (Beispiel: „Bremsen ist Kraft“) und offensichtlich durch den Unterricht bedingt waren. Das Gesamtmodalmap, das sich vor der Unterrichtssequenz ergab, könnte dagegen typisch für eine traditionell unterrichtete Klasse sein (s. Abb. 9) und zeigt einige Fehlvorstellungen.

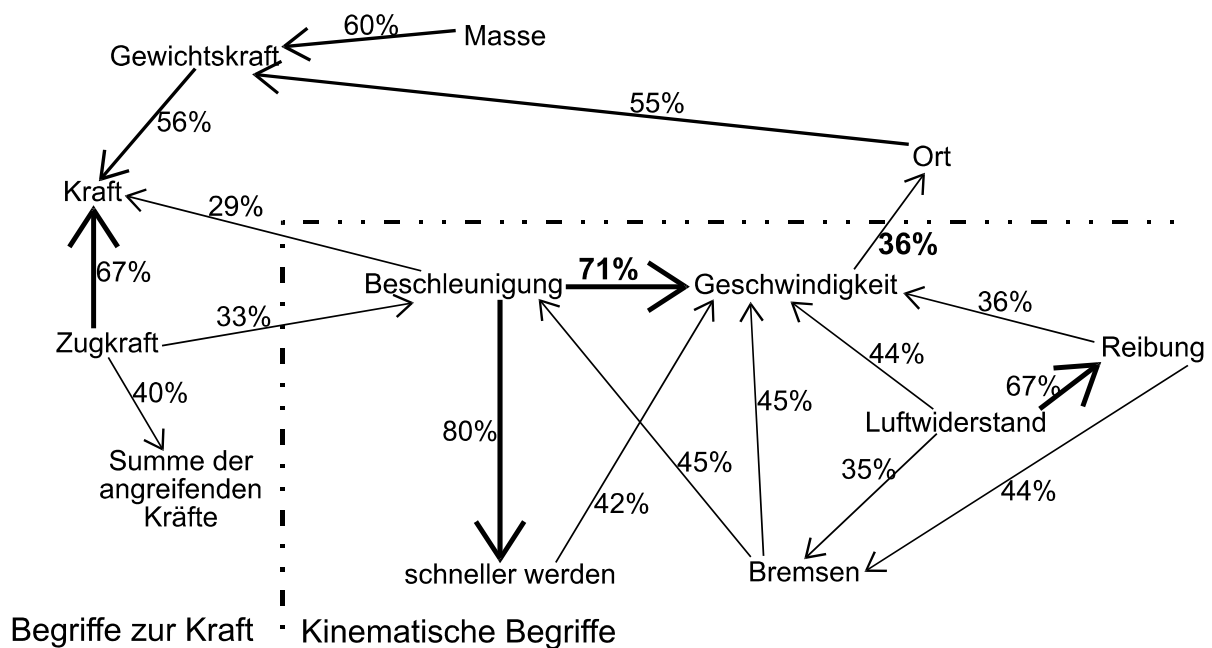


Abb. 9: Modalmap der drei Klassen vor der Unterrichtssequenz

Dass die Beschleunigung auf die Geschwindigkeit wirkt, ist im Vortest insgesamt erfreulicherweise häufig vorhanden (s. Abb. 9). Dass aber genauso die Geschwindigkeit auf den Ort des bewegten Körpers wirkt, ist leider nur schwach ausgeprägt. Sehr häufig wurde genannt, dass der Luftwiderstand eine Reibung ist. Luftwiderstand und Reibung werden anscheinend aber nicht als

Kräfte angesehen. Die Kraftgrößen und die Bewegungsgrößen sind kaum miteinander vernetzt. Mit den Begriff „Summe aller angreifender Kräfte“ können die Schüler nichts anfangen, obwohl die Lehrer vorher sagten, dass dies unterrichtet wurde. Nur ein Drittel gibt an, dass die Beschleunigung von der Zugkraft abhängt, und nur ein Fünftel, dass sie von der Masse abhängt. Nur bei sehr wenigen Schülern hängt sie auch von Reibung, Kraft und Luftwiderstand ab. Die Aussage „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ ist nicht richtig; wahrscheinlich haben die Schüler hier an das zweite newtonsche Gesetz in der Form $F=m \cdot a$ gedacht, da man sowohl „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ als auch „Masse beeinflusst Kraft“ findet. D.h. sie haben das zweite newtonsche Gesetz nicht verstanden, sondern nur eine Formel gelernt.

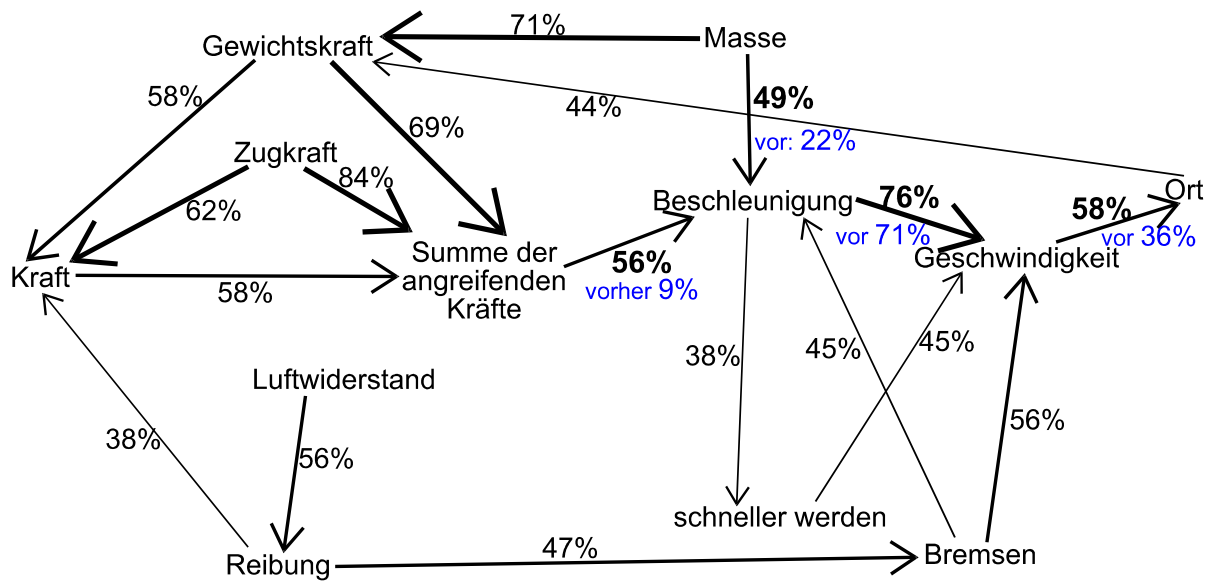


Abb. 10: Modalmap der drei Klassen nach der Unterrichtssequenz

Das Modalmap nach den sechs Stunden Unterricht unterscheidet sich deutlich vom vorhergehenden (s. Abb. 10). Der Begriff „Summe aller angreifender Kräfte“, mit dem die Klasse vorher nichts anfangen konnte, wird nun zu einem wichtigen Begriff. Die wesentlichen Verbindungen kamen im Nachtest deutlich häufiger als im Vortest vor: $\Sigma F \rightarrow a$ (56% statt 9%), $a \rightarrow v$ (76% statt 71%), $v \rightarrow x$ (58% statt 36%) und $m \rightarrow a$ (49% statt 22%). Die Aussagen „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ und „Masse beeinflusst Kraft“, wie auch andere falsche Aussagen finden sich fast nicht mehr.

Zusätzlich ist noch zu sagen, dass im Vortest von den möglichen Verbindungen sehr viele auch wirklich vorkamen, es wurde also fast alles von irgendeinem Schüler einmal verbunden. Im Nachtest kamen deutlich weniger Verbindungen vor. Die Verbindungen des Nachtests wurden folglich von mehr Schülern auch gewählt. D.h. während beim Vortest in der Klasse noch etliche konfuse Vorstellungen bestanden, haben im Nachtest mehr Schüler gezeigt, was wichtig ist. Das passt auch dazu, dass die durchschnittliche Anzahl von Pfeilen pro Schüler beim Nachtest niedriger als im Vortest liegt, da ihnen nun klarer ist, was wichtig ist.

In einer Klasse wurde drei Monate später dieser Test wiederholt, wobei sich die Werte gegenüber dem Nachtest nur leicht verschlechterten, also weit besser als im Vortest waren, so dass es sich nicht um ein kurzfristig angeleitetes Wissen handeln kann. In einer Klasse im Schuljahr 2001/2002, bei der die Modellbildung schon während der Behandlung der Kinematik und Dynamik an geeigneten Stellen eingesetzt wurde, ergab sich ein ähnliches Ergebnis wie im oben erwähnten Nachtest. Hier erschien es so, als ob das Wissen um das Vorgehen beim Erstellen der Wirkungsgefüge beim Modellbildungssystem den Schülern eine Hilfe beim Rechnen quantitativer Aufgaben war, d.h. sie haben das zugrundeliegende Problemlöseschema auch bei Aufgaben ohne Computer angewandt.

Offen bleibt allerdings noch, ob es sich bei dem Wissenszuwachs, der sich in den Modalmaps zeigte, um ein deklaratives Wissen, also Informationswissen, handelt oder um operatives Wissen und Verständnis, wie es die Schüler selbst behaupteten. Ungeklärt ist auch, inwieweit die Schüler bei qualitativen Verständnisfragen auf dieses Wissen zurückgreifen oder Alltagswissen benutzen. Trotzdem kann man insgesamt sagen, dass durch die Modellbildung zusätzliches wichtiges Wissen erworben und es Anzeichen gibt, dass dadurch die Begriffsbildung und das Verständnis der Schüler gefördert wurden und Fehlvorstellungen abgebaut wurden.

8. Ausblick

Mit den hier kurz dargestellten Möglichkeiten, grundlegende Aussagen, die die physikalische Abläufe bestimmen, durch dynamisch ikonisch Repräsentationen zu vermitteln und mit der eingesetzten Modellbildung Strukturzusammenhänge bewußt zu machen, ergeben sich neue methodische Vorgehensweisen für den Unterricht, die zur Überwindung von Fehlvorstellungen in der Dynamik beitragen können. Die hier aufgeführten Möglichkeiten ergeben zusammen mit den Vorschlägen aus [6] in ihrer Abstimmung aufeinander ein neues Unterrichtskonzept. Eine Klasse, die im Schuljahr 2001/2002 danach unterrichtet wurde, zeigt in verschiedenen Verständnistests gute Ergebnisse. Im Schuljahr 2003/2003 werden voraussichtlich zehn Lehrer nach diesem Konzept unterrichten, wozu ausführliche Unterrichtsmaterialien erarbeitet wurden.

Bemerkungen:

Die verwendete Software befindet sich auf folgender CD-ROM:

D. Heuer et. al.: PAKMA 2000 zur Dorn•Bader Physik Sek. II, Bestandteil des Lösungsbandes Dorn•Bader Physik Sek. II (CD zum Schülerband Dorn•Bader Physik Sek. II), Schroedel-Verlag, Hannover, 2001, ISBN 3-507-10734-1

Weitere Informationen zur Software findet man unter <http://www.pakma.de>. Materialien zur durchgeführten Unterrichtssequenz zur Modellbildung findet man unter <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/modell>.

Eine genaue Beschreibung des gesamten Unterrichts zur Dynamik, eine Handreichung für Lehrer sowie vielfältige Materialien dazu können beim Autor unter wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de angefordert werden.

Literatur:

- [1] *Duit, R.*: Vorstellungen und Physiklernen Zu den Ursachen vieler Lernschwierigkeiten – In: Physik in der Schule 30, 1992, Nr. 9, S. 282 - 285
- [2] *Heuer, D.*: Dynamische Physik-Repräsentationen in Realexperimenten - innere Bilder, eine Hilfe zur Konzeptionalisierung - In: *Schneider, W. B.* (Hrsg.): Wege in der Physikdidaktik - Band 3 Rückblick und Perspektive, Palm und Enke, Erlangen, 1993, S. 424 – 436
- [3] *Heuer, D.*: Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, 1996, Nr. 4, S. 2 – 11
- [4] *Heuer, D.; Wilhelm, T.*: Physikalische Abläufe verständlich machen durch Visualisierung von Strukturaussagen mit Hilfe des Computers, unveröffentlichtes Manuskript
- [5] *Blaschke, K.; Heuer, D.*: Dynamik-Lernen mit multimedial-experimentell unterstütztem Werkstatt-Unterricht Erfahrungen mit einem Unterrichtskonzept – In: Physik in der Schule 38, 2000, Nr. 2, S. 86 – 91
- [6] *Wilhelm, T., Heuer, D.*: Vermeiden von Fehlvorstellungen in der Kinematik - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung – In diesem Heft
- [7] *Renkl, A.*: Lehren und Lernen – In: *Tippelt, R.* (Hrsg.): Handbuch der Bildungsforschung, Leske + Budrich, Opladen, 2002
- [8] *Nachtigall, D.*: Zum Verstehen von Physik im Unterricht – In: Physik in der Schule 30, 1992, Nr. 2, S. 10 – 13
- [9] *Wodzinski, R.*: Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht, Lit Verlag, Münster, 1996
- [10] *Blaschke, K.; Heuer, D.*: Dynamik-Lernen mit multimedial-experimentell unterstütztem Werkstatt-Unterricht. Erfahrungen mit einem Unterrichtskonzept, Physik in der Schule 38, 2001, Nr. 2, S. 86 - 91
- [11] *Sokoloff, D.; Thornton, R.*: Using Interactive Lecture Demonstrations to Create an Active Learning Environment – In: The Physics Teacher 35, 1997, S. 340 – 347
- [12] *Wilhelm, T.; Heuer, D.*: Lernen von Konzepten zur Dynamik - dynamische Physikrepräsentation am Computer zur Visualisierung - In: *Behrendt, H.* (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCCP), Leuchtturm-Verlag, S. 163 - 165
- [13] *Heuer, D.*: Dynamische Repräsentationen Verständnishilfe für Physikalische Experimente – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, 1996, Nr. 4, S. 12 – 18
- [14] *Wilhelm, T.*: Der alte Fallkegel - modern behandelt - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, 2000, Nr. 7, S. 28 – 31
- [15] *Bader, F.*: Dorn Bader Physik 11 Gymnasium Sek II, Schroedel Verlag, Hannover, 1998
- [16] *Heuer, D.; Phan-Gia, A.*: Anfahren mit dem Fahrrad – Vergleich: Experiment und Modell - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 46, 1997, Nr. 4, S. 9 - 10
- [17] *Schecker, H.*: Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte, Dissertation Universität Bremen, 1985
- [18] *Mandl, H.; Gruber, H.; Renkl, A.*: Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen - In: *Kuhn, W.* (Hrsg.): Didaktik der

Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 21 - 36

[19] *Bethge, T.*: Mechanik in der Sekundarstufe II - Ein Kurskonzept unter Nutzung von Software-Werkzeugen - In: *Wiebel, K. H.* (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDGP), Leuchtturm-Verlag, S. 152 – 154

[20] *Reusch, W.*; *Gößwein, O.*; *Heuer, D.*: Grafisch unterstütztes Modellieren und Messen – VisEdit und PAKMA – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49, 2000, Nr. 6, S. 32 – 36

[21] *Peuckert, J.*; *Fischler, H.*: Concept Maps als Diagnose- und Auswertungsinstrument in einer Studie zur Stabilität und Ausprägung von Schülervorstellungen – In: *Fischler, H.*; *Peuckert, J.* (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie, Studien zum Physiklernen, Band 1, Logos-Verlag, Berlin, 2000

Anschrift der Verfasser:

StR. Thomas Wilhelm, Prof. Dr. Dieter Heuer, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg